

В. А. ГОРУШКО, В. А. ПИЛИПЕНКО, В. В. ПОНАРЕДОВ, Т. В. ПЕТЛИЦКАЯ,  
В. А. СОЛОДУХА, С. В. ШВЕДОВ

## ОЦЕНКА РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Проведен расчет равномерности нагрева кремниевых пластин по их площади в камере установки быстрой термической обработки. Показано, что отклонение температуры от среднего значения не зависит от времени и является одинаковым как в начале, так и в конце быстрых термообработок (БТО) световыми импульсами секундной длительности, совпадая с неравномерностью светового потока по площади пластины.

**Ключевые слова:** быстрая термическая обработка; равномерность нагрева; фотонный поток; теплопроводность.

Based on the three-dimensional nonstationary equation for heat conductivity, the calculation of the heating uniformity of silicon wafers over the area within a chamber of the rapid thermal treatment unit was performed. It was shown that the temperature deviation from the mean value is not dependent on time, being equal both at the beginning and at the end of the rapid thermal treatment procedure with pulse duration of several seconds and coincident with the light flux nonuniformity over the wafer area.

**Key words:** rapid thermal treatment; heating evenness; photon flow; heat conductivity.

При практическом использовании БТО в технологии создания интегральных микросхем (ИМС) важнейшее значение имеет равномерность нагрева кремниевой пластины по всей ее площади, поскольку разброс температуры, превышающий 50 °С при нагреве пластины до 1000 °С, вызывает термические напряжения в кремнии, приводящие к его пластическому течению, что, в свою очередь, оказывает влияние на параметры обрабатываемых функциональных слоев и их воспроизводимость.

Для определения разброса температуры по площади пластины, обусловленного неравномерностью облучения поверхности пластины, рассмотрим трехмерное, нестационарное уравнение теплопроводности

$$\rho c(T) \partial T / \partial t = \partial / \partial x [k(T) \partial T / \partial x] + \partial / \partial y [k(T) \partial T / \partial y] + \partial / \partial z [k(T) \partial T / \partial z], \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность кремния;  $c$  – теплоемкость кремния;  $T = T(x, y, z, t)$  – температура пластины в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ .

Уравнение (1) решается с начальным условием

$$T(x, y, z, t) = T_0$$

и граничными условиями:

$$-(k \partial T / \partial z)_{z=0} + \sigma \epsilon_{\text{с.ч}} (T_{z=0}^4 - T_0^4) - E_M(x, y, 0) = 0;$$

$$\sigma \epsilon_{\text{с.ч}} (T_{z=h}^4 - T_0^4) + (k \partial T / \partial z)_{z=h} = 0,$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности кремния;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $\epsilon_{\text{с.ч}}$  – степень черноты кремния;  $h$  – толщина пластины кремния;  $E_M$  – плотность мощности светового потока, поглощенного кремниевой пластиной. Для решения уравнения (1) упростим его путем интегрирования уравнения по толщине пластины:

$$\int_0^h \rho c(T) \partial T / \partial t \, dz = \partial / \partial x \int_0^h k(T) \partial T / \partial x \, dz + \partial / \partial y \int_0^h k(T) \partial T / \partial y \, dz + \\ + [k \partial T / \partial z]_{z=h} - [k \partial T / \partial z]_{z=0}.$$

Используя граничные условия и выражая с их помощью производные по  $z$  на поверхности пластины через плотность мощности светового потока, поглощенного кремниевой пластиной, и температуру на поверхности, уравнение (1) можно представить в виде

$$\int_0^h \rho c(T) \partial T / \partial t \, dz = \partial / \partial x \int_0^h k(T) \partial T / \partial x \, dz + \partial / \partial y \int_0^h k(T) \partial T / \partial y \, dz + E_M(x, y, 0) - \\ - \sigma \epsilon_{\text{с.ч}} (T_{z=0}^4 + T_{z=h}^4 - 2T_0^4). \quad (2)$$

Поскольку градиент температуры по толщине пластины при БТО импульсами секундной длительности практически отсутствует, то уравнение (2) запишется в виде

$$\rho c(T) \partial T / \partial t = \partial / \partial x [k(T) \partial T / \partial x] + \partial / \partial y [k(T) \partial T / \partial y] + h^{-1} E_M(x, y) - 2h^{-1} \sigma \epsilon_{\text{с.ч}} (T^4 - T_0^4), \quad (3)$$

где  $E_m = (1 - R)E_{m0}$ ;  $E_{m0}$  – плотность мощности фотонного потока, падающего на пластину.

В связи с тем, что неравномерность облучения по площади пластины не достигает больших величин, то, используя уравнение теплопроводности, проведем линеаризацию выражения (3). Для этого температуру пластины представим следующим образом:

$$T(x, y) \cong \bar{T} + G(x, y),$$

тогда

$$c(T) \cong c(\bar{T}) + G \partial c / \partial T;$$

$$k(T) = k(\bar{T}) + G \partial k / \partial T,$$

$$T^4 \cong \bar{T}^4 + 4\bar{T}^3 G.$$

Уравнение теплопроводности для температуры  $G(x, y)$  имеет вид

$$\begin{aligned} \rho c(\bar{T}) \partial G(x, y) / \partial t = k(\bar{T}) (\partial^2 G / \partial x^2 + \partial^2 G / \partial y^2) - \left( 8\sigma \epsilon_{c, \text{ч}} \bar{T}^3 h^{-1} + \rho \partial c / \partial T \right) \times \\ \times G(x, y) + h^{-1} [E_m(x, y) - \bar{E}_m]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для упрощения (4) введем обозначения:

$$G_0 = G_1 \exp \left[ \int_0^t \alpha(\bar{T}) / \rho c(\bar{T}) dt \right],$$

$$\alpha(\bar{T}) = 8\sigma \epsilon_{c, \text{ч}} \bar{T}^3 h^{-1} + \rho \partial c / \partial T,$$

$$\varphi(t) = \int_0^t \alpha(\bar{T}) / \rho c(\bar{T}) dt,$$

тогда выражение (4) примет вид

$$\rho c(\bar{T}) \partial G_0 / \partial t = k(\bar{T}) (\partial^2 G_0 / \partial x^2 + \partial^2 G_0 / \partial y^2) + h^{-1} [E_m(x, y) - \bar{E}_m] \exp \varphi(t). \quad (5)$$

Для решения (5) применим аппарат функций Грина. С этой целью введем новые переменные:

$$\tau = \int_0^t k(\bar{T}) / \rho c(\bar{T}) dt, \quad \beta(\tau, x, y) = [\Delta E_m / k(\bar{T})] h^{-1} \exp \varphi(t).$$

Это позволяет записать выражение (5) в виде

$$\partial G_0 / \partial \tau = (\partial^2 G_0 / \partial x^2 + \partial^2 G_0 / \partial y^2) + \beta(\tau, x, y). \quad (6)$$

Функция Грина выражения (6) имеет вид

$$G(\bar{r} - \bar{r}', \tau) = (1/4\pi\tau)^{-1} \exp - |\bar{r} - \bar{r}'| \frac{2}{4\tau},$$

где  $\bar{r} = (x, y)$ ,  $\bar{r}' = (x', y')$ .

С учетом начального условия (2) решение уравнения (5) можно записать следующим образом:

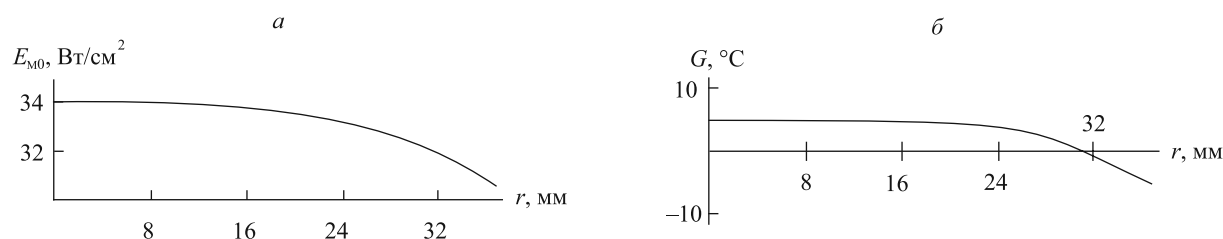
$$\begin{aligned} G(x, y, t) = 1/4\pi h \iiint \left\{ \exp - \left\{ \frac{|\bar{r} - \bar{r}'|^2}{\int_t^t [k(t'') / \rho c(t'')] dt''} - \int_t^t [\alpha(t'') / \rho c(t'')] dt'' \right\} \Delta E_m(\bar{r}') \right\} \times \\ \times \left\{ \int_t^t [k(t'') / \rho c(t'')] dt'' \rho c(\bar{T}) \right\}^{-1} dt' dx' dy'. \end{aligned} \quad (7)$$

Полная температура на поверхности пластины определяется выражением

$$T(x, y, t) = \bar{T}(t) + G(x, y, t),$$

где  $T(t)$  – решение уравнения теплопроводности;  $G(x, y, t)$  – решение уравнения (7).

Уравнение теплопроводности решалось с использованием неявной численной схемы итерационным способом, а для решения (7) использовалась кусочно-постоянная аппроксимация подынтегрального выражения и интегрирование по времени производилось с использованием регуляризации для обхода полюсов<sup>1</sup>. Результаты расчета представлены на рисунке.



Распределение плотности мощности светового потока (а) и отклонение температуры от ее среднего значения (б) по радиусу кремниевой пластины диаметром 76 мм

Таким образом, отклонение температуры от среднего значения не зависит от времени и является одинаковым как в начале, так и в конце БТО световыми импульсами секундной длительности, совпадая с неравномерностью светового потока по площади пластины. Так, при неравномерности светового потока 3 %, что обеспечивается геометрическими размерами камеры, разброс температуры по площади пластины не превышает 0,01 %. При наличии большой неравномерности облучения происходит перераспределение температуры по площади пластины в процессе ее нагрева.

Поступила в редакцию 29.10.2014.

**Валентина Алексеевна Горушко** – ведущий инженер ГЦ «Белмикроанализ» Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

**Владимир Александрович Пилипенко** – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета БГУ.

**Владимир Васильевич Понарядов** – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по экономике и инвестициям физического факультета БГУ.

**Татьяна Владимировна Петлицкая** – кандидат технических наук, начальник сектора ГЦ «Белмикроанализ» Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

**Виталий Александрович Солодуха** – генеральный директор ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

**Сергей Васильевич Шведов** – директор Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

УДК 621.315.592

П. К. САДОВСКИЙ, А. Р. ЧЕЛЯДИНСКИЙ, В. Б. ОДЖАЕВ, В. В. УГЛОВ,  
П. И. ГАЙДУК, С. Л. ПРОКОПЬЕВ, Д. П. ШЕЙНИКОВ

## ПОШАГОВЫЙ МЕТОД ИМПЛАНТАЦИИ КРЕМНИЯ ИОНАМИ БОРА ПРИ БЫСТРОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

Исследовано образование остаточных протяженных нарушений в кремнии, имплантированном ионами В<sup>+</sup> пошаговым методом, при быстром термическом отжиге (БТО). В отличие от термического отжига в печи при БТО пошаговый метод, совмещенный с эффектом аннигиляции дефектов на примесях замещения (эффект Воткинса), не обеспечивает снижения концентрации остаточных нарушений. Это связывается с высокой мгновенной концентрацией точечных дефектов, образующихся из комплексов радиационных дефектов при БТО. При четырехшаговой имплантации и БТО (1000 °С, 4 · 10 с) диффузионные профили бора совпадают с профилями диффузии при имплантации в один шаг (10 с).

**Ключевые слова:** кремний; бор; пошаговая ионная имплантация; радиационные дефекты; быстрый термический отжиг.

Residual damages in silicon B<sup>+</sup> implanted using the multistep method and rapid thermal annealing (RTA) were studied. Unlike thermal annealing, the multistep method at RTA combined with the effect of defect annihilation on substitutional impurities (Watkins effect) do not provide lowering of the residual damage concentration. This is explained by a high instantaneous concentration of the point defects formed from radiation defect complexes at RTA. For four-step implantation and RTA (1000 °C, 4 · 10 s) the boron diffusion profiles are coincident with diffusion profiles at one-step (10 s) implantation.

**Key words:** silicon; boron; multi-step ion implantation; radiation defects; rapid thermal annealing.

<sup>1</sup> Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М., 1987.